

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУР ПОВЫШЕННОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ В ТВЕРДЫХ СПЛАВАХ И СТАЛЯХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ СПЕКАНИЯ И ШЛИФОВАНИЯ

Гуцаленко Юрий Григорьевич, старший научный сотрудник, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, Харьков, Украина, 61002, gutsalenko@kpi.kharkov.ua

Аннотация: Рассматриваются и объясняются процессы формирования электроразрядными технологиями высокоплотных тонкодисперсных структур в результате спекания и шлифования твердых сплавов, а также шлифования сталей с образованием в них белых слоев. Предложена теория прогнозирования оптимального давления в рабочих процессах предварительного (искрово-плазменное спекание) и окончательного (алмазно-искровое шлифование) формообразования порошковой керамики. Подход основан на законе Пашена-Пеннинга для энергетической минимизации осуществимости электрического разряда по напряжению пробоя в приложении к максимальной текущей локальной пористости объекта технологии. Максимальной исходной порой допускается вакансия единичного зерна в его объемной интерпретации сферической моделью. Полученный теоретически оптимальный результат для исходной зернистости порошковой смеси 40...80 нм (10...20 МПа) симметричен и близок оптимальной практике (7,5...25 МПа). Зависимость величины сжимающих напряжений в токопроводной керамике от контактной механической нагрузки при алмазно-искровом шлифовании имеет аналогичный экстремальный характер.

Ключевые слова: искрово-плазменное спекание, алмазно-искровое шлифование, токопроводные материалы, электрический разряд, подавление пористости, белый слой, сжимающие напряжения, микротвердость.

Введение

Высокая износостойкость тугоплавких керамик, особенно на вольфрамокарбидной основе, устойчиво поддерживает их привлекательность в различных инструментальных и конструкционных применениях. При этом повышение их функциональности объективно связывается с формированием высокоплотных тонкодисперсных структур технологиями порошковой металлургии. Эффективным методом получения таких структур является разработанное в Японии и развиваемое ведущими технологическими державами искрово-плазменное спекание (SPS – spark plasma sintering), использующее прямой нагрев электрическим током исходно порошкового содержимого рабочей камеры консолидации под давлением,

сопровожающийся действием электрических разрядов в уплотняемой среде. С оглядкой на собственный и мировой опыт, современным лидером разработки метода в стране приоритета (М. Токита) особо выделяется роль электрических разрядов в результатах его применения и в этой связи российский технологический исток (Б. Р. и Н. И. Лазаренко, 1943 г.) в его предтечах [1].

Последующее шлифование токопроводной SPS керамики с одновременным воздействием на ее поверхность электрическими разрядами позволяет дополнительно улучшить структуру и микротвердость в поверхностном слое с формированием в нем сжимающих остаточных напряжений, и тем самым функциональность готового изделия [2].

При импульсной обработке поверхности сталей со скоростями нагрева порядка 10^5 - 10^6 К/с до температур фазовых превращений (выше Ас3) вплоть до плавления с немедленным охлаждением со скоростями не ниже 10^3 - 10^4 К/с в них также формируются специфические переходные структуры между обычной закалкой и аморфным состоянием повышенной твердости (белые слои), обычно включающие высокодисперсный мартенсит, остаточный аустенит, карбиды и (в отдельных случаях) феррит [3]. Формирование таких структур в сталях характерно для интенсивного алмазно-искрового шлифования (АИШ), сочетающего механическое резание и импульсную электроэрозионную обработку [4]. Неизбежно сопровождающее механическое резание сталей их пластическое деформирование также способствует формированию белых слоев при АИШ, как и при термофрикционной обработке [3]. В результате фазовых структурных превращений и пластического деформирования в формируемых белых слоях повышенной твердости возникают остаточные напряжения сжатия, что, как и после АИШ токопроводной керамики, обуславливает повышенную контактную работоспособность.

Однако механизмы формирования эксплуатационно оптимальных структур в технологиях керамики и сталей имеют существенные отличия. Представленная работа связана с выделением, теорией и практикой учета этих отличий в организации технологических процессов SPS и АИШ керамик (в том числе твердых сплавов на основе карбида вольфрама), а также АИШ сталей с целью формирования в них структур повышенной функциональности.

Предлагаемый теоретический подход к режимной оптимизации SPS консолидации токопроводных порошковых керамик обусловлен исходной пористостью консолидата и необходимостью ее последовательно эффективного преодоления как типичной технологической наследственности заготовительных производств порошковой металлургии в технологиях инструментальной и конструкционной керамики.

Теория оптимальной SPS консолидации

Сущность улучшения спекания и уменьшения роста зерен в производстве порошковой керамики состоит в опережающей рост зерен активации

уплотнения и более энергичном его протекании. В теоретических представлениях электроконсолидационных процессов [5] с увеличением концентрации электрополярных линий в зонах обтекания электрическим током пор с большим поперечным размером формируются и большие градиенты температур. Это принуждает структурные вакансии к диффундированию из окружения больших пор в сторону меньших, выравнивая плотность электрического поля вместе с увеличением числа и (или) размера меньших пор за счет размерного стеснения больших пор, как отмечается в [5]. Одновременно облегчаются условия их электроразрядного преодоления в ходе электроконсолидации.

Ролевые функции искровых разрядов в этом процессе связываются со скольжением по межзеренным границам [6] и действием непосредственно в промежутках пористости. Под углом зрения энергоэффективного преодоления (уменьшения) пористости наибольший интерес представляет создание условий минимизации потенциала зажигания электрических разрядов в газовых средах пор спекаемого под давлением консолидата. В результате пробойные возможности реализуются с минимумом числа пор, обойденных прямым электроразрядным действием.

Эффективное подавление пористости в SPS консолидации порошковых систем предлагается производить под давлением, величина которого обеспечивает минимальное напряжение пробоя электрическим разрядом пустот, характерных для текущего состояния консолидата.

В экспериментальной физике испытывающих управляемое давление однокомпонентных газовых сред известны минимумы $U_{np\ min}$ потенциала U_{np} зажигания в них электрических разрядов, следующие из экстремальных кривых Пашена [7]. В соответствии с законом Пашена $U_{np\ min} = const$ для данной газовой среды соответствует некоторому однозначно определенному постоянству произведения $P \cdot h = (P \cdot h)_{opt}$ величин исходного давления P и разрядного промежутка h . Известен также эффект Пеннинга [8], состоящий в дополнительном понижении минимумов Пашена в компаундных газовых структурах с присутствием примесей, потенциал энергии возбуждения метастабильного уровня которых ниже, чем в чистом основном газе, в том числе во влажных средах с однокомпонентной газовой основой.

Тогда, исходя из определяющей роли электроразрядного фактора и экспериментальных закономерностей Пашена-Пеннинга, можно предположить, что оптимальное давление прессования P_{opt} при нанопорошковой электроконсолидации, во всяком случае в первом приближении, подчиняется зависимости вида $P_{opt} = k \cdot (P \cdot h)_{opt} / h$, где h – размерная характеристика нанопорошка (диаметр зерна в сферической модели), k – поправочный коэффициент, учитывающий состав газовой среды; криволинейность геометрии промежутка в порах (кривые Пашена получены в экспериментальных условиях с плоскими электродами и однородным электрическим полем); известную

приближенность закона Пашена и тем большую точность, чем меньше P и h , и, в то же время (по некоторым экспериментальным данным), искажения начального участка кривой Пашена при пробое малых разрядных промежутков (при одновременно малых $P \cdot h$ и h), объясняемые поддержанным туннелированием эффектом Шоттки; теплофизический фон и др.; в общем случае $k > 0$ и, в частности, с повышенным ожиданием $0 < k < 1$ в исходно нормально влажных средах реального компактирования.

Априорно можно утверждать, что необходимой доказательной основой справедливости гипотезы об определенном подчинении оптимального давления прессования при электроконсолидации закону Пашена применительно к технологиям наноструктурной тугоплавкой керамики является относительная близость (в пределах одного порядка) величин расчетного давления при $k = 1$ (с использованием кривой Пашена для доминирующего газа среды спекания) и из реальной опытно-экспериментальной оптимизационной практики. Доказательной основой справедливости гипотезы о пропорциональном подчинении – относительная близость величин k для соотношений $k = P_{opt} \cdot h / (P \cdot h)_{opt}$, полученных с использованием $(P \cdot h)_{opt}$ Пашена и данных о P_{opt} (диапазоне изменения P_{opt}) в практике работы с порошками (смесью порошков) разных зернистостей в одной и той же среде спекания.

Например, из разрешения закона Пашена для газовой среды (в приближенной оценке $U_{np \min} = 0,35 \text{ В}$ при $(P \cdot h)_{opt} = 0,8 \text{ Па} \cdot \text{м}$) для порошковой смеси с исходными размерами зерен в диапазоне от 40 до 80 нм следует диапазон P_{opt} от 10 до 20 МПа, с последовательной ориентацией на преимущественное подавление от более крупных исходных пор, максимальных для зернистости 80 нм (расчетное значение $P_{opt} = 10 \text{ МПа}$), к максимальным для зернистости 40 нм (расчетное значение $P_{opt} = 20 \text{ МПа}$).

Условия обсуждаемых экспериментальных исследований

Порошковая смесь с исходными размерами зерен в диапазоне от 40 до 80 нм по приведенному примеру теоретического расчета диапазона P_{opt} соответствует реальной SPS практике [9] получения высокоплотных тонкодисперсных равновесных (50/50 мас. %) Al_2O_3 –WC композитов, когда исходные порошки имели зернистость 40...70 нм (WC) и 60...80 нм (Al_2O_3).

Остаточные напряжения в поверхностном слое после алмазно-искрового шлифования токопроводящего карбида вольфрама с изменяемым фиксированным усилием прижима инструмента к поверхности обработки в диапазоне 0...1,2 МПа изучены в диссертационном исследовании [2].

Характеристики структуры поверхностного слоя в стали 65Г после финишной поддержки алмазно-искровым шлифованием белого слоя от предварительной термофрикционной обработки приводятся в системном представлении по работе [10].

Результаты и обсуждение

В поддержанном давлением рассматриваемом SPS электроконсолидационном опыте получения композитов повышенной функциональности, соответствующем примеру теоретического расчета диапазона P_{opt} для первых стадий спекания, диапазон давлений первых ступеней цикла подавления пористости составляет примерно от 7,5 до 25 МПа [9].

Из сопоставления установленных опытно-экспериментальным путем и из $(P \cdot h)_{opt}$ по Пашену значений давлений на границах диапазона исходной максимальной пористости, соответствующего по [11] диапазону исходной зернистости спекаемых порошков, следует, что теоретический диапазон является внутренним по отношению к опытному с отклонениями каждой границы опытного диапазона на 25 %. При этом коэффициент k соответственно изменяется от $k = 0,75$ (нижняя граница) до $k = 1,25$ (верхняя граница). Таким образом обеспечивается повышенная надежность формирования оптимальных условий электроразрядного подавления пористости в условиях реальной форморазмерной статистики максимальных пор, в контексте [11] приближенно описываемых сферической моделью зерна. При этом условия выдержки $P_{opt} = 25$ МПа уже соответствуют запуску как преобладающего механизма деформационной реструктуризации спекаемого компаунда с уплотнительным скольжением границ смежных зерен друг относительно друга.

В АИШ полученного спеканием под давлением с прямым токоподводом монокристалла вольфрама формирование его функционально оптимальной высокоплотной приповерхностной структуры с достижением наилучших физико-механических свойств по критерию напряженного состояния шлифованного материала также происходит при некотором оптимальном значении давления, как это следует из [2].

В сталях, по сравнению с тугоплавкими керамиками обладающих меньшей эрозионной стойкостью и большей податливостью тепловому действию электрического тока, под действием электрических разрядов и механического давления в условиях АИШ также наблюдается формирование упрочненного поверхностного слоя повышенной твердости. Наблюдаемая измененная структура с признаками частичной аморфизации (белый слой), что не обнаруживается в обработке керамик, своим происхождением обязана характерной сталям повышенной пластичности и объемной плотности, что меняет преимущественные акценты в проявлении и наследственности электрических разрядов, отражаемой повышением нижней границы и среднего значения микротвердости в зоне белого слоя толщиной порядка 0,5 мм (таблица, сталь 65Г) [10].

Характеристика		После ТФО	После АИШ
Микротвердость, МПа	Основной металл (среднее)	5,3	
	Белый слой	8,2-11,2	9,0-11,0
Мартенситная микроструктура	Основной металл	Игольчатая	
	Белый слой	Деформированная зернистая	

Выводы

Предложенный приближенный расчетный подход к определению исходных давлений прессования на начальных этапах реализации полного технологического цикла нанопорошковой SPS электроконсолидации согласуется с практикой и рекомендуется к применению в опытно-экспериментальных разработках промышленных технологий тугоплавкой керамики.

В АИШ после SPS формирование функционально оптимальной по критерию напряженного состояния шлифованного материала высокоплотной поверхностной структуры также подчиняется экстремальной зависимости от величины давления в шлифовальном рабочем контакте.

В измененной поверхностной структуре стали с признаками частичной аморфизации (белый слой) в результате АИШ, наследующей деформированный зернистый мартенсит, предположительно в локализациях, определяемых миграциями пятен каналов электрических разрядов в электромеханическом контакте алмазного инструмента на металлической связке и обрабатываемой токопроводной заготовки, проявляется импульсная «раскачка» и последующее изменение характера и энергетической структуры связей в кристаллической решетке и межкристаллитных.

Работа выполнена по комплексному проекту ХНУ, НТУ «ХПИ», УГУЖТ (г. Харьков) и СГУ (г. Сумы) «Многокомпонентные композиционные материалы и покрытия на основе наносоединений тугоплавких металлов», номер государственной регистрации 0113U001340 (Украина).

Список литературы

1. Tokita M. Recent Advanced Spark Plasma Sintering (SPS). Technology, Systems and Applications in Japan [Электронный ресурс] // 2-я международная школа-семинар «Перспективные технологии консолидации материалов с применением электромагнитных полей»; г. Москва, Нац. исслед. ядер. ун-т «МИФИ», 20-23 мая 2013 г. : [сайт]. URL : <http://lemc-lab.mephi.ru/content/file/news/tokita.pdf> (дата обращения: 29.05.2015).
2. Стрельчук Р. М. Визначення особливостей та раціональних умов алмазно-іскрового шліфування твердих сплавів з нанорозмірних зерен монокарбиду вольфраму : Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти / Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». Х., 2011. 193 с.
3. Бабей Ю. И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. К. : Наук. думка, 1988. 237 с.

4. Фукс М. С., Беззубенко Н. К., Свердлова Б. М. Состояние поверхностного слоя материалов после алмазной и эльборовской обработки. К. : Вища шк., 1979. 160 с. 5. Райченко А. И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока. М. : Металлургия, 1987. 128 с. 6. Dense nanostructured materials obtained by Spark Plasma Sintering and Field Activated Pressure Assisted Synthesis starting from mechanically activated powder mixtures / F. Berhard, S. Le Gallet, N. Spinassou et al. // Science of Sintering. 2004. No. 36 : 155-164. 7. Paschen F. Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure bei verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz // Annalen der Physik und Chemie. 1889. Vol. 5 (273) : 69-96. 8. Penning F. M. Electrical Discharges in Gases. New York : Macmillan, 1957. 118 p. 9. Геворкян Э. С., Гуцаленко Ю. Г. Подбор оптимальных режимов горячего прессования нанопорошковых смесей $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--WC}$ для инструментальных применений // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2010. №5/1(47). С. 13-18. 10. Gutsalenko Yu. Diamond-spark grinding in forming of functional white layers of increased microhardness in steels // Fiability & Durability. Targu Jiu : Editura "Academica Brancusi", 2008. No. 2 : 1-3. 11. Гусев А. И., Ремпель А. А. Нанокристаллические материалы. М. : Физматлит, 2001. 224 с.

Formation of structures of increased functionality in hard alloys and steels by sintering and grinding under electric discharge technologies

Yury G. GUTSALENKO, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", 21, Frunze str., 61002, Kharkov, Ukraine, gutsalenko@kpi.kharkov.ua

Abstract. It is for the first time that the attempt of the combined review and explanation of the formation processes of high-density fine increased functionality structures as a result of sintering and grinding of carbide and steel grinding under electric discharge technologies is being made. The problems of predicting the optimum conditions of the implementation of the working processes for the prior (spark-plasma sintering) and final (diamond-spark grinding) forming of the objects of the nanopowder materials science innovations that are corresponding to modern sixth technological order are being actualized from the position of accelerating their effective implementation. The formation of a white layer in the steel at the diamond-spark grinding is being considered. Physical features and benefits of spark-plasma sintering and diamond-spark grinding technologies combined with direct current feeder to the operating area are caused by the action of electrical discharges. The pressure which effect on the object of the working process is the controlled parameter and the variation factor in the search the best technical result in practice of both technological methods. The ability of optimization of the spark-plasma sintering and diamond-spark grinding processes by controlling of this parameter of the processing mode is being theoretically grounded and practically shown. The approach is based on Paschen-Penning's law for energy minimization of feasibility of electric discharge

under breakdown voltage as for the maximum current local porosity of the object of technology. Vacancy of a single grain in its volume interpretation of a spherical model is accepted as an initial pore. The theoretical optimal result (10...20 MPa) which is got for the powder mixture with the original granularity of 40...80 nm is symmetric and close to the best practice (7,5...25 MPa). The dependence of the compressive stress in the electrically conductive ceramics from the contact mechanical load when diamond- spark grinding has a similar extreme character. It is shown that the diamond-spark grinding of white layer in steel after thermofrictional treatment raises the lower limit and the average value of the microhardness in it.

Keywords. spark-plasma sintering, diamond-spark grinding, electrically conductive materials, electrical discharge, suppression of porosity, white layer, compressive stresses, microhardness.